WALTHER GERLACH

PROBLEME DER ATOM-ENERGIE

BIEDERSTEIN VERLAG MÜNCHEN

Ex-libris
dr. iur.
F. v. Bassermann
Jordan

PROBLEME DER ATOMENERGIE

Rede
gehalten in der öffentlichen Sitzung
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in München am 5. Oktober 1948

VON

WALTHER GERLACH
O. PROFESSOR FÜR EXPERIMENTALPHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

BIEDERSTEIN VERLAG MÜNCHFN
HERVORGEGANGEN AUS DEM VERLAG C. H. BECK

Walther Gerlach wurde am 1. August 1889 in Biebrich am Rhein geboren

Copyright 1948 by Biederstein Verlag Gustav End München
Druck der C. H. Beck'schen Buchdruckerei, Nördlingen
US-E-178. Auflage 5000

Prometheus wurde an die Klippen geschmiedet, weil er das Feuer vom Himmel zur Erde brachte. Im Feuer gab er den Menschen das Mittel zur Entwicklung von Zivilisation und Kultur; die Menschen aber mißbrauchten die Himmelsgabe zur Zerstörung dessen, was sie mit ihr geschaffen. Zeus hatte das vorausgesehen: deshalb ließ er Prometheus an die Klippen schmieden, weil er den Menschen ein Gut gebracht, für welches sie nicht reif waren.

Das Feuer war die erste Energiequelle, welche die Menschen befähigte, chemische Reaktionen bei höheren Temperaturen zum Ablauf zu bringen, sei es im Erschmelzen von Eisen und Bronze, sei es bei dem Brennen von Tongefäßen und Ziegeln, sei es zum Weichmachen von Nahrung durch Kochen und Braten. Glück und Unglück der Menschheit wachsen mit der Beherrschung der Energie, mit der Entdeckung neuer Energieformen, mit ihrer Auswertung in der Technik zur Schaffung und Zerstörung von Zivilisation und Kulturgütern – um so schneller, je mächtiger diese Energien sind.

Als Energiequellen in der Natur sind die Sonnenstrahlung, die Wasserfälle, die Winde, die Blitze seit altersher bekannt. Die Sonne liefert der Erde nicht nur die Wärme; ihre Lichtstrahlung ermöglicht die Assimilation der Kohlensäure, den Aufbau der organischen Substanz der Pflanzen aus Kohlensäure und Wasser, dabei der Atmosphäre den für Tier und Mensch erforderlichen Sauerstoff als Abfallprodukt liefernd. Die Sonnenstrahlung liefert die Energie zur Erzeugung von Vitaminen; sie bringt die Wärme, welche zur Überführung des Meerwassers in Regenwolken erforderlich ist, und schafft die Temperaturdifferenzen, welche die Winde und damit den Transport der Wolken bedingen. Sie schmilzt die Gletscher und liefert so Wasserfälle und Flüsse, welche Mühlen und Turbinen antreiben. Die Sonne ist die Energiespenderin für unser ganzes Leben. Aber schon Archimedes soll mit großen Spiegeln ihre Strahlung auf unerwünschte Schiffe konzentriert haben, um diese zu entflammen. Doch hat sich dieser Mißbrauch der Sonne nicht gehalten; aber tastende Vorversuche – schon von Cosimo III. von Toscana – sind gemacht, durch die Konzentration von Sonnenstrahlen im Brennpunkt großer Hohlspiegel Temperaturen von über 4000° zu wissenschaftlichen Zwecken zu erzeugen. Die Windenergie treibt Windmühlen

und Windkraftwerke und wird in ihnen in andere Energieformen umgesetzt; die elektrische Energie der Blitze auszunutzen, blieb in Anfangsversuchen stecken; aber ihre chemische Wirkung in der Bildung von Stickstoffverbindungen, die mit dem Regen als Düngemittel auf Feld und Wald gebracht werden, ist von Bedeutung.

Das „Feuer" bei der Verbrennung organischer Substanzen – Kohle, Holz, Erdgas, Alkohol, Azetylen, Benzol u. v. a. –, das heißt bei ihrer Überführung in Kohlenstoff, Kohlensäure und Wasser, wird als chemische Verbrennungsenergie bezeichnet. Bei genügend hoher Temperatur, die als „Initialzündung" durch das Anzünden erst einmal an *einer* Stelle erzeugt werden muß, laufen mit Hilfe des Luftsauerstoffs die chemischen Reaktionen weiter, welche man als exotherm – Wärme nach außen abgebend – bezeichnet. In unserem Körper gehen chemische Reaktionen vor sich, in welchen durch die Änderung der Bindungsenergien beim Abbau der Nahrungsmittel die so beliebten Kalorien geliefert werden.

Chemische Bindungsenergie ist es, welche der Freiburger Mönch Berthold Schwarz bei der Verbrennung des Pulvers in Freiheit setzte, damit den Grundstein für die Sprengstoffchemie legend; ihre Verwendung im Bergbau, bei der Rodung ist einer der wichtigsten Faktoren für die Zivilisation; gleichzeitig erwiesen sich diese Substanzen jahrhundertelang als ihr wirksamstes Vernichtungsmittel.

Freiwerdende chemische Bindungsenergie bewirkt die schlagenden Wetter – den *ungeregelten, unkontrollierten* Ablauf der gleichen Reaktionen, welche bei *geregelter Führung* uns das Gaslicht und die Kochflamme geben.

Die wissenschaftliche Erforschung des Energieproblems in dem Sinne, in dem wir es bei unseren Beispielen und heute allgemein gebrauchen, begann vor genau 150 Jahren, als Benjamin Thompson, genannt Graf Rumford, seinen berühmten Münchener Versuch zur Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie am 25. Januar 1798 in der Royal Society zu London vortrug. 1842 stellte Julius Robert Mayer in Heilbronn am Neckar das Gesetz der Erhaltung der Energie auf, das noch heute unbestrittene Naturgesetz. Genau 101 Jahre nach Rumford, am 19. Januar 1899, publizierten Elster und Geitel, das berühmte Wolfenbütteler Oberlehrerpaar, die Entdeckung einer neuen

Energiequelle in der Natur: bei der natürlichen Umwandlung der radioaktiven Elemente (die 1896 von Becquérel entdeckt, von Pierre und Marie Curie 1898 – vor 50 Jahren – chemisch isoliert worden waren) wird Energie erzeugt: ein radioaktives Atom ist ein instabiles Gebilde; gleich einem Sprengstoff geht es unter Energieabgabe in ein anderes stabileres Atom über.

In den folgenden Jahrzehnten wird das Wesen dieser Atomenergiequelle erkannt: Es ist die Bindungsenergie, welche *in* den Atom*kernen* enthalten ist. Die chemische Reaktionsenergie beruht auf Kräften *zwischen* den Atomen, welche sie zu einem chemischen Molekül vereinigen; sie gehen von der äußersten Sphäre der Atome aus und sind wesentlich elektrische Wechselwirkungskräfte. Die Kernenergie ist gänzlich anderer Art; sie liegt eingeschlossen im Kern des Atoms; ein Teil von ihr wird frei, wenn ein Atomkern sich in einen anderen verwandelt. Sie ist viel, viel größer als die chemische Reaktionsenergie – bezogen auf jeden Elementarakt. Aber die Zahl der zerfallenden radioaktiven Atome ist so sehr klein im Vergleich zur so sehr großen Zahl der an einer chemischen Reaktion beteiligten Atome, daß sie technisch ohne Interesse, sogar physikalisch nur mit feinsten Hilfsmitteln nachweisbar ist.

Und noch etwas unterscheidet diese beiden Energiereaktionen: den Ablauf der chemischen Reaktion kann man schnell und langsam machen, man kann ihn einleiten, wann man will – also beherrschen. Die radioaktive Kernreaktion geht nach dem in der Substanz liegenden Gesetz vor sich, sie ist – bis heute – durch kein einziges äußeres Mittel beeinflußbar.

Mit dieser Erkenntnis schien ein ganz altes Problem erneut und neuartig aufgreifbar zu sein: woher kommt eigentlich die enorme Energie, welche die Sonne ausstrahlt, welche trotz des dauernden Verlustes ihre Temperatur auf gleicher Höhe hält; woher kommen die ungeheuren Energieausbrüche, die in den plötzlich erscheinenden und bald wieder verschwindenden Novae- und Supernovae-Sternen vor sich gehen? Sind hier Kernenergien – *geregelt* bei der Sonne, *ungeregelt* bei den Novae – wirksam? Sind dies etwa Reaktionsenergien von Atomkernen, welche im irdischen Laboratorium noch nicht gefunden waren? Heute sind diese Kern- oder Atomenergien bekannt, im kleinen und im großen stehen sie in mannigfachen Formen zu nützlichem Gebrauch und mißbrauchender Anwendung zur Verfügung.

Bei der Untersuchung der radioaktiven Substanzen warf Rutherford die Frage auf, ob es möglich sei, die bekannten stabilen Elemente unserer Erde in andere zu verwandeln, so wie das bei den radioaktiven Elementen von selbst, spontan, vor sich geht. Er hatte erkannt, daß jedes Atom aus einem sehr kleinen Kern besteht, in dem die ganze Masse konzentriert ist, und einem weit ausgedehnten, sehr locker gefügten Elektronengewebe. Der Kern ist elektrisch-positiv geladen, die Elektronen haben die entgegengesetzte Ladung; das Wechselspiel der Kräfte hält beide Teile als „Atom" zusammen. Um ein Atom in ein anderes zu verwandeln, mußte also der vom Elektronengewebe gegen Eingriffe gut geschützte Kern verändert werden. Ein radioaktives Atom hat einen nicht-stabilen Kern, aus welchem ein Bruchstück mit enormer Energie herausfliegt. Dieses sollte also auch befähigt sein, in den Kern eines anderen, stabilen Atoms einzudringen; das war Rutherfords Idee, und sie führte schnell zum Erfolg, zur künstlichen Umwandlung eines Elements in ein anderes: beim ersten Versuch (1919) zur Bildung von Sauerstoff aus Stickstoff.

Es war ein neuer Typ von Reaktionen gefunden. Bei der chemischen Reaktion bleiben die Atome erhalten; die chemische Reaktion besteht nur in der Verbindung von Atomen zu Molekülen, in der Umlagerung von Atomen innerhalb von Molekülen, oder in der Abtrennung von Atomen aus Molekülen. Bei der Kernreaktion werden die Atome geändert, wird aus einem chemischen Grundstoff ein anderer gemacht.

Auch bei der Kernreaktion kann Wärmeenergie frei werden. Da aber schon die Zerfallszahl eines radioaktiven Elements klein ist und nur ein kleiner Teil der Kernbruchstücke mit seiner vollen Energie einen so kleinen Kern eines anderen Atoms treffen kann, so ist die Ausbeute und damit auch die etwaige Energiegewinnung von ganz kleiner Größenordnung technisch uninteressant.

Im Jahre 1942 – 100 Jahre nach Robert Mayer – wurde es Gewißheit, daß eine 1938 von Otto Hahn und Fritz Straßmann entdeckte Kernreaktion, die sog. Spaltung des Urans, unter bestimmten Bedingungen sich *mengenmäßig* so steigern kann, daß Kernenergien, deren Natur experimentelle und theoretische Physik mittlerweile erschlossen hatten, in großer Menge frei werden. Die hierbei zutage getretenen Probleme zu behandeln, ist Sache der Wissenschaft. Wie aber heute jeder wenigstens einen Begriff von dem Dieselmotor oder vom Rundfunkverstärker hat, so sollte

auch das aus dem Bereich der wissenschaftlichen Spekulation in die technische Realität übergegangene Problem der Atomenergie zum allgemeinen Bildungsgut gehören; neben höchsten Erkenntniswerten und segenbringenden Anwendungen gab die Lösung dieses wissenschaftlichen Problems der Menschheit ein furchtbares Vernichtungsmittel in die Hand und stellte sie so vor menschliche Probleme, deren Lösung die weitere Entwicklung der Menschheit entscheidend beeinflussen wird.

Wie alle naturwissenschaftlichen Entdeckungen ist auch die Uranspaltung das Endglied einer langen Kette von Experimenten und Schlüssen und gleichzeitig das erste Glied einer in Gegenwart und Zukunft neu zusammenzufügenden Kette.

Man hatte Rutherfords Versuch der Kernumwandlung durch Beschießen mit den materiellen Bruchstücken der radioaktivzerfallenden Atome auf viele Atome des periodischen Systems der Elemente ausgedehnt. Bei Versuchen mit dem Element Beryllium fand man eine besondere Erscheinung: es wurde Kohlenstoff gebildet, es fehlte aber ein Teil der Masse. Chadwick erkannte 1932, daß bei dieser Kernreaktion ein neues Elementarteilchen sich ablöst; es ist etwa so schwer wie das Wasserstoffatom, enthält aber keinerlei elektrische Ladung; Masse ohne Ladung war bis dahin unbekannt; wegen dieser inneren Neutralität erhielt es den Namen *Neutron*. Sein kleines Volum befähigt es, durch das Elektronengewebe eines Atoms leicht hindurchzukommen; das Fehlen einer Ladung beseitigt die Hindernisse, welchen ein geladenes Kernbruchstück bei der Annäherung an einen Atomkern unterliegt. In alle Atomkerne der chemischen Elemente vermag ein solches Neutron einzudringen; es bildet darin aber oft einen Fremdkörper, welcher das Wechselspiel der Kernkräfte, die die Stabilität der Atome bedingen, stört. Die Folge ist, daß die Kerne nach Eindringen des Neutrons instabil werden und sich in andere Atome verwandeln. Dringt ein Neutron speziell in den an sich schon nicht mehr ganz stabilen Urankern ein, so gibt es eine Katastrophe: der Kern explodiert, er spaltet sich auf in zwei kleinere Atome und einige Neutronen.

Bei dieser Spaltung wird Wärmeenergie frei; wichtiger ist aber, daß gleichzeitig auch neue Neutronen entstehen: denn diese können sich nun an andere Urankerne anlagern, wodurch diese wieder zerplatzen, wieder Energie und noch einmal neue Neutronen

liefernd. Diese lagern sich dann wiederum an andere Urankerne an, sprengen diese erneut – und so geht der Prozeß weiter als *Kettenreaktion*, immer schneller und schneller. Ein einziges Neutron liefert im ersten Uranatomzerfall die Initialzündung, welche zur Explosion der ganzen Uranmenge führen muß.

In unserer Atmosphäre sind natürliche Neutronen vorhanden, und Uran ist ein auf der Erde weitverbreiteter, allerdings nur selten in großen Lagern vorkommender Stoff. Warum besteht denn dieses Uran überhaupt noch, warum ist nicht längst jede Uranmenge in solcher Kettenreaktion zerfallen? Spricht nicht die Erfahrungstatsache, daß man erhebliche Mengen von Uranmetall lagern kann, gegen die eben ausgeführte Kettenreaktion?

Nun – wir haben eben einige Nebenumstände noch nicht beachtet. Zunächst einmal ist das Neutron wie gesagt ein außerordentlich kleines Materieteilchen und der Urankern ist auch sehr klein. Ein Stück Metall ist wie ein lichter Wald, durch welchen man ein weites Stück hindurchsehen kann. Der „Blick" sei das kleine Neutron: viele von ihnen können zwischen den Bäumen hindurchdringen. Wird der lichte Wald aber immer ausgedehnter, so nimmt diese Wahrscheinlichkeit ab und wird schließlich Null: jetzt wird der Wald undurchsichtig. Nur in einem dicken Stück Uran wird also ein großer Teil der Neutronen auch wieder neue Urankerne treffen; ist es nicht genügend dick, so wird ein Teil der Neutronen aus ihm entweichen, die Kettenreaktionen werden immer wieder abgebrochen; die Energieentwicklung bleibt langsam.

Der zweite Umstand ist der, daß überhaupt nicht jeder Uranatomkern diese Spaltung als Folge einer Neutronenanlagerung erleidet. Für den Chemiker ist „Uran" ein Stoff, der ganz bestimmte chemische Eigenschaften hat. Für den Physiker ist Uran der Sammelbegriff für eine ganze Anzahl von Atomarten, welche zwar alle ganz gleiche chemische Eigenschaften haben, aber nicht die gleichen Kerne. Wir erinnern uns, daß wir anfangs sagten, die chemischen Bindungskräfte wirken nur zwischen den äußersten Teilen, gewissermaßen den Oberflächen der Atome; diese sind gleich. Die Kerne unterscheiden sich aber durch ihren Aufbau, durch ihre Masse. Solche Atomsorten nennt man Isotope, weil sie in einem nach dem chemischen Verhalten geordneten System „am selben Platze" stehen. Von den drei verschiedenen Atomarten des natürlichen Urans zeigt aber nur eine die Spaltung, nach ihrem Atomgewicht als Uran 235 bezeichnet; und diese ist nur zu 0,72%

in der gesamten Menge vorhanden. Unser Atomwald ist also noch viel lichter, als wir dachten. Er muß also sehr ausgedehnt sein, damit aus ihm keine Neutronen entweichen können.

Noch eine dritte Einschränkung für den energieliefernden Zerfall besteht. Wir sagten, daß beim Zerplatzen eines Urankerns auch Neutronen herausfliegen – sie fliegen mit sehr großer Geschwindigkeit. Das Uranisotop 235 nimmt aber schnelle Neutronen nicht auf, sondern nur langsam fliegende. Sie müssen also erst abgebremst werden. Man muß zwischen das Uranatom, welches beim Zerplatzen schnelle Neutronen liefert, und die Uranatome, welche von diesen Neutronen gespalten werden sollen, eine Bremssubstanz einschalten; als solche ist das berühmte schwere Wasser oder auch reinster Graphit geeignet. Die Kettenreaktion und damit die Energielieferung erhält man also nur dann, wenn sehr große Uranmengen und Bremssubstanz in einer bestimmten Art der Schichtung angeordnet sind.

Aber noch eine vierte Schwierigkeit muß überwunden werden. Ein anderes Uranisotop, nach seiner Masse bezeichnet als 238, das über 99% der gesamten Uranmasse bildet, hat gerade die Eigenschaft, daß es schnelle Neutronen wegfängt, ohne aber zu spalten; es unterbricht durch Wegfangen der Neutronen die Kettenreaktion. Die Dicke der einzelnen Uranblöcke darf also nur so groß sein, daß ein Zusammenstoß zwischen den beim Zerfall entstehenden schnellen Neutronen und Uran 238 noch nicht zu häufig stattfindet.

Damit haben wir die Prinzipien für den Bau der Energie liefernden Uranmaschine, des Uranbrenners oder, wie man in Amerika sagt, des Uranium-Pile: eine sehr große Menge – mehrere Tonnen – Uran ist in Stücke bestimmter Größe unterteilt, zwischen denen die Bremssubstanz sich befindet. An irgendeiner Stelle wird durch ein zufällig vorhandenes Neutron eine erste Spaltung eintreten. Von den sich bei jedem 235-Atom-Zerfall bildenden Neutronen treffen mehr auf neue Uran-235-Atome, als weggefangen werden oder aus der Maschine entweichen; die Kettenreaktion läuft ab mit einer Geschwindigkeit und damit einer Wärmeentwicklung, welche nur vom Verhältnis der reagierenden zu der verlorengehenden Neutronenzahl abhängt. Durch Regelung dieses Verhältnisses, wozu es verschiedene Mittel – gleichsam Ventile, durch welche Neutronen entweichen können – gibt, heizt der Brenner stärker oder schwächer. Er liefert aus dem Atom stam-

mende Wärmeenergie, welche wie die chemische Energie in der Feuerung von Dampfmaschinen in andere Energieformen umgesetzt werden kann.

Je größer die Uranmasse, desto mehr Spaltungen laufen gleichzeitig ab, desto schneller geht die Energie-, die Wärmeentwicklung; sind alle Neutronenventile geschlossen, so explodiert die Maschine.

Ich möchte hier eine technische Bemerkung über die *Atombombe* einfügen. Wie ist die Zeitungsnachricht einer relativ kleinen Bombe verträglich mit unserem Ergebnis, daß nur Anhäufungen von Tonnen von Uran explosibel sind? Um in unserem Bilde zu bleiben: man muß den Atomwald der alleinspaltenden 235-Uranatome dichter machen; man muß aus dem Haufwerk der verschiedenen Uranatome diese eine Atomsorte herausholen und zusammensetzen; dann fehlen die 238-Atome, welche Neutronen abfangen, und die 235er sind mehr als zehntausendmal dichter gepackt. Ein die Initialzündung lieferndes Neutron ist immer vorhanden, aber aus ein paar Kilo können doch noch zu viele der neugebildeten Neutronen entweichen; es bleibt bei einzelnen Atomexplosionen. Vergrößert man diese Masse aber plötzlich über eine kritische Größe, indem man *schnell* zwei noch ungefährliche Massen vereinigt, so läuft die Kettenreaktion in Millionstel Sekunden ab, die ganze Masse explodiert.

Noch ein zweiter Weg wurde eingeschlagen. Wir erinnern uns, daß in der Uranmaschine ein Teil der Neutronen von den 238er-Atomen weggefangen wird; hierbei werden zwei neue Elemente aufgebaut, das Neptunium und vor allem das Plutonium. Letzteres hat die gleichen Eigenschaften wie das 235er-Uran: es spaltet durch Neutronenaufnahme unter Energieabgabe. Kleine Mengen sind wieder ungefährlich, aber größere Mengen detonieren. Dieses Plutonium wird in einer Uran-Wärmekraftmaschine laufend erzeugt und aus ihr mit chemischen Verfahren abgetrennt. Jeder Uranbrenner ist gleichzeitig eine Fabrik dieses fürchterlichen Sprengstoffes – Ausnutzung der Atomenergie und Herstellung des Atombombenstoffs sind voneinander nicht trennbare Prozesse. Das ist eine physikalische Grundlage des internationalen Problems der *Atomenergiekontrolle*.

Neptunium und Plutonium haben aber noch eine viel größere Bedeutung: es sind zwei chemische Elemente, Grundstoffe, die in natürlichem Zustande auf der Erde nicht gefunden wurden.

Bis vor wenigen Jahren war Uran das höchste Element; es war ein Problem der Atomphysik, die Gründe zu erkennen, warum es keine schwereren Elemente gibt. Heute besitzen amerikanische Institute und Atombombenwerke wohl Hunderte von Kilogramm des neuen Elements Plutonium. Man kennt sogar schon zwei weitere noch höhere Elemente, die durch Kernreaktionen aufgebaut werden, und man hat keinen Grund, an der Herstellbarkeit noch weiterer neuer Elemente zu zweifeln.

Warum sind diese Elemente auf der Erde nicht vorhanden? Alle diese neuen Elemente sind radioaktiv, d. h. sie zerfallen wieder, manche schneller, manche – wie das Plutonium – sehr langsam. Es ist somit anzunehmen, daß sie in einem früheren Stadium der Erdgeschichte vorhanden waren. Physik und Chemie sind also dabei, im Laboratorium eine materielle Welt aufzubauen, aus der sich die jetzige vielleicht entwickelt hat. Hier liegen physikalische Probleme über Atombau und Atombildung auf der Hand, deren Lösung uns in immer tiefere, herrlichere Geheimnisse der Welt Einblick verspricht, Wege, die zu verfolgen uns menschliche Verpflichtung dünkt.

Aber wieder erkennen wir, daß die reinste wissenschaftliche Forschung verbunden ist mit der Schaffung des Grundstoffs der Atombombe; die *Möglichkeit* geistigen Fortschrittes wird ein Teil des Problems der *Atomenergiekontrolle*. Eine Forschungskontrolle scheint uns unmöglich; sie würde die Forschung töten, die ein Kind der Freiheit ist. Eine künstlich erzwungene Begrenzung der Forschung ist gleichbedeutend mit Stillstand; sie erscheint uns als eine Sünde gegen den, der uns den Geist zum Forschen gab. Naturalia non sunt turpia – was der Mensch sehen kann, darf er auch sehen; aber *kein* Menschenwerk bringt Segen, welches das höchste Gut, die Ethik, außer acht läßt.

Woher stammt nun diese Energie, welche bei Kernreaktionen beobachtet, welche speziell beim Zerplatzen eines Uranatoms frei wird und welche infolge der von selbst weiterlaufenden Kettenreaktion solch unvorstellbar große Beträge erreichen kann?

Die physikalische Fassung des Problems der Kernenergie stammt aus der speziellen Relativitätstheorie: es ist das Prinzip der Äquivalenz von Materie und Energie. Robert Mayer hatte das Prinzip aufgestellt, daß alle „Kraft"arten der Natur nur verschiedene Erscheinungsformen gleicher Qualität sind, bei deren Um-

wandlung ineinander eine Quantität, die wir heute Energie nennen, unverändert bleibt. Einer bestimmten elektrischen Energiemenge ist eine bestimmte Menge mechanischer Arbeit, diese wieder einer bestimmten Menge von Kalorien äquivalent. Daß auch die Materie, das, was wir die Masse eines Körpers nennen, einer ganz bestimmten Energie äquivalent ist, ist eine der tiefen Grundlagen der heutigen Naturerkenntnis. Diese Äquivalenz bedeutet ebensowohl, daß eine Energie mit einer Waage gewogen, als daß Masse in Energie, Energie in Masse übergeführt werden kann.

Eine chemische Verbindung wird dann als Sprengstoff bezeichnet, wenn in ihr eine große Bindungsenergie enthalten ist, die sich bei der Spaltung der Moleküle als Explosion in Wärme umsetzt. Die materiellen Bestandteile des Sprengstoffmoleküls lagern sich um zu Kohlensäure, Wasser und ähnlichen einfachen Molekülen, ohne daß sich an den Atomen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff irgend etwas ändert. Nach dem Äquivalenzgesetz von Energie und Masse ist *jeder* Körper ein Sprengstoff, dessen Energievorrat, dessen explosive Kraft frei wird, wenn seine Masse sich auflöst.

Bei der Uranspaltung zerplatzt ein Atomkern Uran z. B. in ein Atom Barium und ein Atom Krypton und einige Neutronen. Die im Kern des Urans enthaltene Kernbindungsenergie ist viel größer als die in den Kernen der Zerfallsprodukte eingeschlossene; deshalb zerfällt der Urankern, er ist ein energiereicherer Sprengstoff als die Atome des Bariums und Kryptons. Der Überschuß wird in Wärme umgesetzt. Seine Größe ergibt sich aus dem Unterschied der Masse eines Uranatoms und der Masse der Zerfallsprodukte nach der Einsteinschen Gleichung. Aber der größte Teil der Masse bleibt noch in den Zerfallsprodukten erhalten. Die Wärmeenergie der Uranmaschine stammt also nur von einem sehr kleinen Teil der Uranatomenergie; der größte Teil der Atomenergie des Urans bleibt als Materie der Schlacken bestehen. Auch sie frei zu machen ist ein Problem der Zukunft.

Wir kennen schon viele Kernumwandlungen mit Energieabgabe. Der Uranzerfall ist dadurch ausgezeichnet, daß er sich so einfach mit einem Neutron initieren läßt und die Kettenreaktion liefert.

Lithium, ein dem Natrium verwandtes Element, reagiert kernphysikalisch mit Wasserstoff; bei dieser Reaktion wird 22 Millionen mal mehr Wärmeenergie frei als bei der Verbrennung von Kohle mit Sauerstoff – auf gleiche Massen bezogen. Während man aber den Kohlenofen mit einem Zündhölzchen anstecken

kann, braucht man zur Einleitung der Lithium-Wasserstoffreaktion etwa 10 Millionen Grad. In Sternen sind solche Temperaturen vorhanden – *auch* in der explodierenden Atombombe –, und in ihnen laufen solche Reaktionen ab, die von ihnen ausgehenden gewaltigen Strahlungsmengen liefernd. Aber auch bei dieser Reaktion wird nur Bindungsenergie der Kerne frei; das Verbrennungsprodukt bei der Lithium-Wasserstoffreaktion ist Helium. Würde auch dessen Masse sich noch in Wärmeenergie umwandeln, so lieferte *jedes einzelne Gramm* Helium außer der Bindungsenergie noch 20 Billionen Kalorien, d. h. so viel, wie man braucht, um 200 Millionen Liter Wasser von Null Grad zum Sieden zu bringen.

Ich mag nicht mehr solche Zahlenbeispiele geben, um die Sucht nach großen Zahlen, an der unsere Zeit gerade genügend leidet, nicht auch zu fördern. Die Sache selbst ist viel erhabener, als Zahlen auszudrücken vermögen. Wir rühren mit ihr an letzte Dinge unserer materiellen Welt; die Überführung von Materie in Energie, die wir hier nur an Beispielen andeuten konnten, und die experimentell im Laboratorium nachgewiesene Schaffung von Materie aus Strahlungsenergie sind schon in ihren Konsequenzen für das Werden und Vergehen der Welten durchdacht.

Wir kehren nochmals zurück an den Ausgangspunkt, die Hahnsche Entdeckung der Uranspaltung, und fragen nach den materiellen Produkten, die aus dem Uranatom entstehen. Chemisch betrachtet sind es alles bekannte Elemente; unter ihnen befinden sich Barium und Strontium, Jod, Krypton, Xenon. Aber es sind doch nicht genau die bekannten stabilen Atomsorten unserer Gesteine, der Atmosphäre, unserer Chemikalien, sondern sie sind radioaktiv; sie senden radioaktive Strahlungen aus, gleich wie die so sehr seltenen radioaktiven Elemente: zum Unterschied von diesen Stoffen der Natur nennt man sie künstlich-radioaktive Elemente.

Damit sendet also auch der Uranbrenner dauernd radioaktive, alle Materie durchdringende Strahlung aus, welche alles organische Leben beeinflußt, sogar entscheidend durch Wirkung auf Befruchtungs- und Vererbungszellen.

Die Strahlung einer Uranmaschine mag der Radioaktivität von Tonnen von Radium entsprechen. Schon Milligramme des Radiums liefern so viel Strahlungsenergie, daß Segen für erkrankte Organe und Gefahr für gesunde, die wunderbare Strahlentherapie und die furchtbaren Strahlenverbrennungen eng beieinander

liegen. In der Nähe einer Atomenergiemaschine kann, ohne daß diese durch mächtige Schutzwände aus Blei umgeben ist, kein organisches Wesen leben; die für die Anwendung dieser Kraftmaschinen hieraus folgende Einschränkung liegt auf der Hand.

Es ist auch durchaus nicht so, daß eine U-Maschine ohne jede Wartung weiterbrennt, bis das ganze hineingebaute Uran aufgebraucht ist. Die beim U-Zerfall entstehenden Elemente wirken genau wie die Schlacken in einer Feuerung: verhindern diese, daß die Wärme auf neue Kohle übergreift, so fangen jene die Neutronen weg, so daß die Kettenreaktionen abreißen und der Brenner schließlich erlöscht. Die Reinigung des Brenners von diesen so ungeheuer stark und gefährlich strahlenden Schlacken, das Wiederbeschicken mit gereinigtem Uran, kann nur durch einen vollautomatischen Mechanismus erfolgen. Auch die leichte Möglichkeit, mit diesen radioaktiv-strahlenden Schlackensubstanzen unübersehbares Unheil für ganze Volksgruppen und ihre Nachkommenschaft anzurichten, darf nicht außer acht gelassen werden. Nach der Explosion einer Atombombe sind weite Gebiete durch solche Schlacken verseucht.

Wir erinnern uns daran, daß in der Maschine beim Ablauf der Kettenreaktion dauernd neue Neutronen gebildet werden, so daß in einem „laufenden" U-Brenner eine hohe Dichte von Neutronen vorhanden ist. Auch die Neutronen haben physiologische Wirkungen, deshalb muß die Umgebung des Brenners auch vor diesen durch Wassertanks, Betonmauern und andere Stoffe geschützt werden.

Die Neutronen innerhalb der Maschine können aber noch zu einem anderen Zwecke nutzbar gemacht werden. Fast alle Elemente der Welt werden durch Aufnahme von Neutronen in radioaktive Elemente verwandelt. Es gibt radioaktives Natrium, radioaktiven Phosphor, radioaktives Kupfer. Der U-Brenner ist also auch eine Fabrik zur laufenden Erzeugung von radioaktiven Stoffen *aller Art*. Man steckt die zu aktivierenden Substanzen in den Brenner hinein und holt sie nach einiger Zeit in radioaktivem Zustand wieder heraus. In ihrer Herstellung und Verwendung liegt vielleicht – mindestens für die Naturwissenschaft unserer Tage – die größte Bedeutung der Atomenergie.

Ein Atom heißt radioaktiv – ob „natürlich" oder „künstlich" ist gleichgültig –, wenn (wie wir eingangs schon zeigten) sein Kern

unter Absplitterung oder Abwerfen eines seiner Elementarbestandteile sich in einen anderen Atomkern umwandelt. Dieses ausgeschleuderte Bruchstück hat so glückliche Eigenschaften, daß es relativ leicht mit physikalischen Verfahren nachweisbar ist. So kann man aus seinem Nachweis auf die Existenz eines einzigen radioaktiven Atoms schließen, von denen erst eine Billion mal eine Billion einige Gramm wiegt. Dies ist die Grundlage für die Methode der radioaktiven Indikatoren. Von den vielen, vielen Anwendungen dieser künstlich radioaktiven Stoffe – von der reinen Forschung bis zur Lösung praktisch-technischer Aufgaben – kann ich nur einen Begriff geben. Man will z. B. wissen, welche Teile der Pflanze die Stoffe eines Düngers aufnehmen und in welcher Form. Man gibt dem normalen Düngesalz ein ganz klein wenig künstlich-aktiviertes Salz hinzu und stellt dann mit physikalischen Methoden fest, nach welcher Zeit, auf welchem Wege dasselbe z. B. in der Frucht ankommt und unter welchen äußeren Bedingungen die Nährsalze am besten aufgenommen werden; dann zerlegt man die Frucht und prüft, welche chemischen Stoffe der Frucht das Düngesalz aufgenommen haben. Denken Sie sich das gleiche entsprechend variiert ausgeführt mit Heilmitteln oder Giften bei Mensch und Tier, oder bei chemischen Synthesen in der Retorte, so erkennen Sie die unübersehbare Fülle von Fragen, welche mit Verwendung der radioaktiven Indikatoren beantwortbar sein wird. Der Zusatz radioaktiver Elemente zu einem ein bestimmtes Organ beeinflussenden Heilmittel, oder etwa die Möglichkeit, dem ganzen Körper radioaktiv-strahlende Substanzen in Form von Kochsalz einzuverleiben, so daß die Strahlungswirkung nur in einem Organ oder im ganzen Organismus zur Geltung kommt – hiermit seien andere Möglichkeiten nur angedeutet. Dabei ist die Menge der Strahlung und die Zeit, welche sie wirken soll, in weiten Grenzen dosierbar. Dies sind nur einige Beispiele aus umfassenden, in vielen Kulturländern, besonders in den Vereinigten Staaten von Amerika, schon laufenden Forschungsarbeiten, welche Probleme wie Karcinom und Tuberkulose, Pflanzenzüchtung und Vererbung, Ertragssteigerung und Schädlingsbekämpfung, Chemotherapie und Giftwirkung, allgemeine Chemie, Metallforschung und Metalltechnik betreffen.

Zum drittenmal müssen wir aber daran erinnern: wer diesen Segen der entschleierten Atomenergie genießen will, schafft zur gleichen Zeit in fortschreitender Menge furchtbarste Zerstörungs-

mittel; die in seiner Hand befindlichen künstlich-radioaktiven Substanzen sind – im schlechten Sinne angewendet – verheerender als alle Pestkulturen.

Wir erkennen einen dritten Gesichtspunkt der physikalischen Grundlage des Problems der *Atomenergiekontrolle*.

Soll die Menschheit eine neue gewaltige Energiequelle unbenützt lassen, soll sie die Möglichkeit, neue, in ihrer Weite nur ahnbare Erkenntnisse über das Geheimnis der Materie zu gewinnen, außer acht lassen, soll sie die sichere Aussicht auf Heilung von Krankheiten, auf Verbesserung der Lebensbedingungen aufgeben – soll die Menschheit auf alle Forschung auf dem Gebiet, auf dem allein solche wirklichen Fortschritte zu erzielen sind, verzichten, nur weil die dabei erlangten Kenntnisse und Mittel auch zur Selbstvernichtung geeignet sind? Ist das die Tragik des Menschengeschlechts, daß die Entwicklung seiner Ethik ewig hinter dem Fortschreiten des Intellekts zurückbleibt?

Als Prometheus den Menschen das Feuer gebracht hatte, schuf Zeus die Pandora, gab ihr eine Büchse mit allerlei Gaben für die Menschen und schickte sie zur Erde, von den Göttern und Göttinnen des Olymps mit allen weiblichen Eigenschaften versehen; die Neugier ließ sie vorzeitig die Büchse öffnen: Die Übel flogen in die Welt hinaus – sie schloß sie bestürzt – die *Hoffnung* war in der Büchse der Pandora geblieben.

Wir tragen heute noch diese Büchse der Pandora – in unserem Herzen lebt die Hoffnung, die Zuversicht, daß wissenschaftliche Entdeckungen, Fortschritte der Erkenntnis, wo sie auch immer liegen, letzten Endes doch zum Wohle der Menschen dienen. Was ein Mensch erschafft und dem anderen Menschen schenkt, darf nicht mehr vom Dritten zu aller Leid und Schaden mißbraucht werden. Jahrtausendelang haben die Menschen so gehandelt –

Prometheus wurde an die Klippen geschmiedet.